

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.03.012

无刷直流电机矢量控制策略与实现*

李冬冬, 潘海鹏*, 顾敏明

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对无刷直流电机采用传统驱动控制方式存在的电能利用率低、转矩脉动大、噪声高等问题,分析了电机出现这些现象的原因,给出了一种基于矢量控制正弦波驱动无刷直流电机的控制方法,并研制了磁场定向控制无刷直流电机控制系统。该系统以 STM32F103VE 控制器为核心,设计了逆变驱动、过压过流检测与保护等硬件电路,并给出了软件控制策略。实验结果表明,与传统的方波换相方式相比,矢量控制可使换相电流波动下降 52%,降低了电机的转矩脉动和运行噪声,适用于如空调、抽油烟机等进行噪声比较敏感的设备,有较高的应用价值。

关键词:矢量控制;无刷直流电机;转子位置;转矩脉动

中图分类号:TH39;TM332

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)03-0272-06

Vector control strategy of brushless DC motor and realization

LI Dong-dong, PAN Hai-peng, GU Min-ming

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency, torque ripple and noise problem of brushless DC motor driven by traditional control method, the reasons for these phenomena were analyzed, a novel kind of sinusoidal wave drive strategy based on the vector control was proposed for BLDC and the brushless DC motor control system was developed. Inverter driving circuit, protection circuits for overvoltage as well as overcurrent and other hardware circuit were designed at the core of STM32F103VE controller. The results indicate that compared to six-step commutation method, vector control can decrease the fluctuation of the commutation current by 52%, alleviate torque ripple and reduce running noise, which is quite suitable for equipments sensitive to running noise, such as air conditioner, kitchen ventilator. Thus, it has high application value.

Key words: vector control; brushless DC motor; rotor position; torque ripple

0 引言

无刷直流电机具有结构简单、出力大和效率高等优点,不仅广泛应用在国防、航空航天、精密机械、汽车电子等工业领域,还可广泛应用在家用电器和办公自动化等民用领域^[1]。

以往常使用六步方波驱动控制无刷直流电机^[2-3],但采用该方式驱动的电机在换相的过程中常常会出现电流突变的现象,而且具有噪声大、电源利用率低等缺点^[4-5]。近年来,随着控制理论的发展,出现了正弦波电机驱动技术^[6-7],不仅有效地解决了转矩脉动问题,而且

还提高了电源的利用率,节约了电力资源。此外,转矩脉动的减弱,也降低了无刷直流电机产生的环境噪声,使电机适用于一些对噪声敏感的场所,扩大了使用范围。

使用正弦波驱动无刷直流电机常采用的方法有简易正弦波法和和磁场矢量控制法^[8-12](field oriented control)。其中,简易正弦波法是通过控制电机绕组中的正弦波电流的幅值及相位达到控制电机转速的目的,该方法实现简单,但对不同电机适应性较差。磁场矢量控制是将定子磁链解耦,分解为产生磁场和产生转矩两部分,然后分别设计两者的调节器,实现对电机的高性能调速。具体是将三相定子中的电流经过坐标

收稿日期:2016-10-21

基金项目:浙江省重大科技专项重点社会发展资助项目(2014C03027)

作者简介:李冬冬(1991-),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要从事智能检测与控制方面的研究. E-mail:1273797513@qq.com

通信联系人:潘海鹏,男,教授. E-mail:Pan@zstu.edu.cn

变换分解为 I_d (产生磁通), I_q (产生转矩) 两部分, 通过直接控制 I_q 进而达到控制电机转速的目的, 虽然算法实现较为复杂, 但是控制的效率和精度高。

本研究将采用磁场矢量控制方法解决相关的问题。

1 系统工作原理

无刷直流电动机转动, 须先根据转子位置传感器的输出信号确定转子位置。然后通过电子换相线路驱动电机本体使电枢绕组依次馈电, 从而在定子上产生旋转的磁场, 驱动永磁转子转动。采用六步换相驱动电机示意图如图 1 所示。

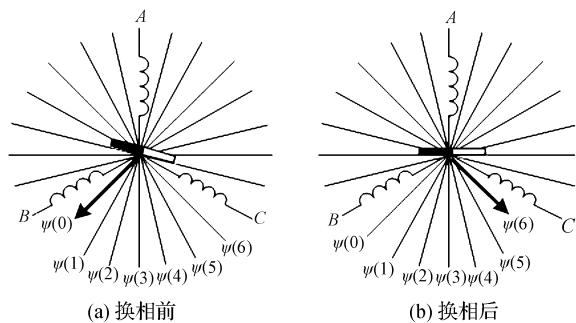


图 1 换相前后定子磁链方向

电机三相中通入 A 相流入, B 相流出电流时, 合成磁链位于 $\Psi(0)$ 位置, 当转子位于换相前 (a) 所示位置时, 改变外部电流流入方向, 使其 A 相流入, C 相流出, 则合成磁链位于 $\Psi(6)$, 超前于转子磁场 120 度, 这样就可以使产生最大转矩的垂直位置正好处于本次通电的中间时刻。所以, 在六步换相过程中仅有在转子磁链与合成磁链垂直时才能保持最大转矩, 其余位置有一部分能量损失。

磁场矢量控制是通过调整三相电压, 进而合成空间任意位置磁链矢量, 位置传感不断检测转子空间位置, 为使转子具有最大转矩, 应使合成磁链与转子磁链保持垂直。

实施磁场矢量控制具体是将采集到的三相定子电流 I_a, I_b, I_c , 通过 Clarke 变换得到相互正交、静止坐标系下的 I_α, I_β , 再通过 Park 变换得到同步旋转坐标系下的 I_q, I_d , 将 I_q, I_d 与控制系统设定值 I_q^*, I_d^* 比较后, 经设计的 PID 调节器输出控制量 V_q, V_d , 最后经过 Repark 变换得到 V_α, V_β , 由得到的 V_α, V_β 即可调制出符合要求的波形, 进而对逆变电路中开关的通断实施控制, 达到对电机控制的目的, 其系统控制结构如图 2 所示。

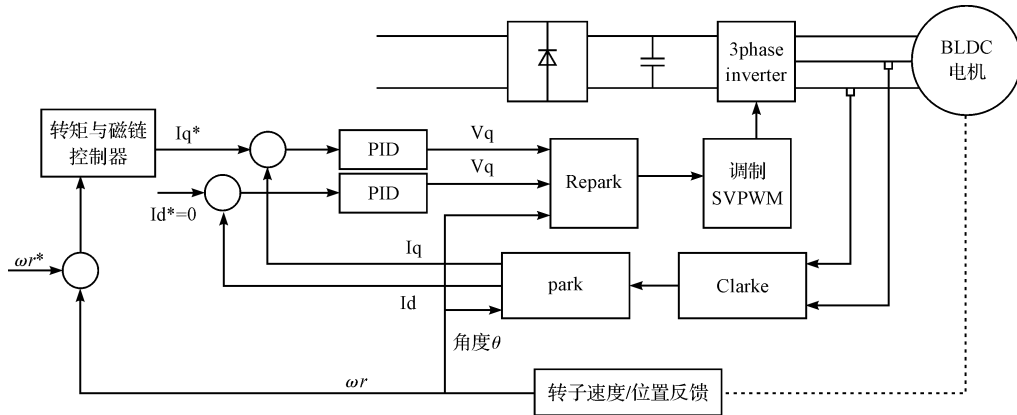


图 2 无刷直流电机矢量控制系统结构图

从图 2 可得出, 执行矢量控制算法的关键技术是对转子位置的估计, 进而控制电机转子按要求运行。

转子角度一般通过位置传感器获取, 根据调速精度要求的不同可分为: 高分辨率位置传感器和低分辨率位置传感器。高分辨率位置传感器如光电编码器、旋转编码器等, 虽获取位置信号精度高, 但成本也高, 适用于军工、精密加工等领域。该系统主要针对空调、抽油烟机 etc 民用设备进行驱动控制, 调速精度要求相对较低, 因此, 采用霍尔传感器进行位置检测, 既满足了精度要求, 又实现了低成本设计。

常用的带霍尔三相无刷直流电动机一般有 3 个位置传感器, 根据其传感器安装的相对位置可分为间隔 60 度霍尔和间隔 120 度霍尔。不同的传感器安装位置对应不同的霍尔波形, 一旦安装位置确定, 霍尔扇区和电角度对应的关系也就固定不变。

一般 3 个霍尔位置传感器输出信号, 把每个 360° 电角度划分为 6 个 60° 的不同扇区, 即每隔 60° 电角度, 便有一个位置信号发生跳变, 这样在一个周期内有 6 个转子位置被准确确定。所以当前转子位置可表达为:

$$\theta_i = \theta_i' + \omega_{i-1} \times k \times T_s \quad (1)$$

式中, θ_i —当前转子所在位置; θ_i' —当前霍尔扇区的起始位置, 即霍尔信号跳变时所对应的准确转子位置角度值; T_s —采样时间; k — T_s 更新次数; ω_{i-1} —前一扇区的角速度。

由于在当前 60° 电角度区间持续的时间不可能事先得知, 在软件设计时使用前一扇区的平均速度代替当前扇区的速度即:

$$\omega_{i-1} = \frac{\pi}{3T_{i-1}} \quad (2)$$

通过分析可知, 若电机运行在匀速状态, 转子角度的获取比较准确, 当电机加速或者减速时, 相邻两个 60° 电角度霍尔扇区持续的时间将会不同, 若仍然用上一扇区所持续的时间来估算当前 60° 扇区内转子的位置, 必然会有一些的误差, 如果不进行相应的位置校正, 当转子角度误差积累超过一定角度时, 电压空间矢量与转子 d 轴之间的实际位置将发生错位, 将会造成电机的失步震荡甚至停转。由于转子和定子之间相互的磁极反应对应不同的输出状态, 所以利用三相位置信号提供的 6 个准确的转子位置信息, 每隔 60° 电角度对电压空间矢量的相位进行一次校正, 可以消除位置误差的积累。具体情形分析如图 3 所示。

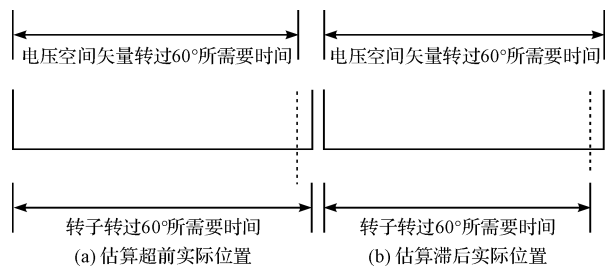


图 3 转子实际位置与软件估算位置

图 3(a) 中软件估算电压空间矢量已经转过 60° 电角度, 但实际转子还没有转完 60° 电角度, 转子位置滞后合成电压空间矢量, 此时应保持空间矢量的相位不变, 直至转子转过 60° 电角度霍尔传感器产生准确的校正信号才做切换。对于图 3(b) 所示情况刚好相反, 实际转子已经转过 60° 电角度, 但软件估算电压空间矢量还没有转完, 当霍尔信号产生时, 应该立即将电压空间矢量的相位切换至校正相位。此时, 如果两者计算出的角度相差比较大, 采取强制校正会导致转矩出现强烈的脉动, 为了使转子位置不产生突变, 可以采用线性角度校正方法, 使两者角度误差逐渐缩小。其实现过程是: 在换相时计算出软件空间矢量与实际转子位置误差 $\Delta\theta$, 若 $\Delta\theta \leq \theta^*$ 时, 采取强制校正, 若 $\Delta\theta > \theta^*$ 时, 采取逐步校正, 即通过若干 PWM 周期进行过渡, 直至角度误差小于 θ^* 。具体空

间矢量位置校正如图 4 所示。

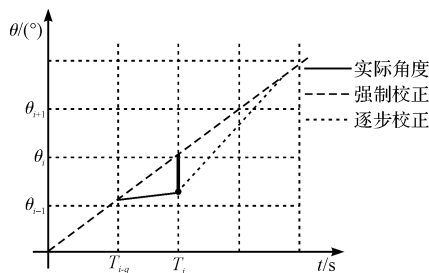


图 4 空间矢量位置校正

不断经过上述位置信号预估计校正后, 可以使电压空间矢量与转子同步旋转, 并且保证转矩最大, 能量利用率最高。

2 无刷直流电机控制系统设计

本研究该控制系统采用 STM 公司 STM32f103 作为主控芯片, 基于霍尔传感器实现无刷直流电机的矢量控制, 其控制系统硬件主要由逆变驱动电路、过压过流保护电路、霍尔传感电路以及其他外围电路等组成。

2.1 系统硬件设计

2.1.1 逆变驱动电路

本研究采用 IR2103 驱动功率开关管控制无刷直流电机运行, 控制信号通过 IR2103 的 HIN、LIN 端口输入, 经过处理后由片上的 HO、LO 端口输出。图 5 中, D5 为自举二极管, C5、C6 为自举电容。为减少振铃现象和平缓栅极充电电流, 本研究在芯片信号输出端连接一电阻, 其优点是: ①防止振铃现象, 芯片 IR2103 输出口会带一些杂散电感, 当电压突变时可能与栅极电容形成 LC 震荡, 当 MOS 管串联一电阻后, 增大了阻尼, 减小了震荡; ②减小栅极充电峰值电流。当栅极电压拉高时, 首先对栅极电容充电, 为防止充电电流过大, 串联电阻后可增加充电时间, 减小栅极充电峰值电流。

2.1.2 过流保护电路

在整个无刷直流电机控制系统中, MOS 管是最为关键也是最为脆弱的一个环节, 在实际运行时经常由于电流过大或者温度过高导致 MOS 管烧毁。因此在硬件方面直接采取措施避免 MOS 管烧毁事件。如图 6 所示, 母线电流经过电阻采样和两个瓷片电容去除高频谐波后, 得到 DCBUSC 信号, 经过比较器 LM358 与硬件电路中设定电压相比较, 其比较结果输入到由 555 芯片搭建的单稳态触发器中, 单稳态电路对瞬时低电平响应快, 并且持续响应时间稳定, 能够有效检测

到每个过流状态。过流信号 O_C 输入到总线收发器 74HC245 芯片的三态门使能端,当硬件电路中发生过流时,三态门使能端将禁止单片机送出的 MOS 管开关

信号传送到 IR2103 芯片中,因此 MOS 管被全部关断,掐断母线电流,保护了硬件电路。逆变驱动电路如图 5 所示。

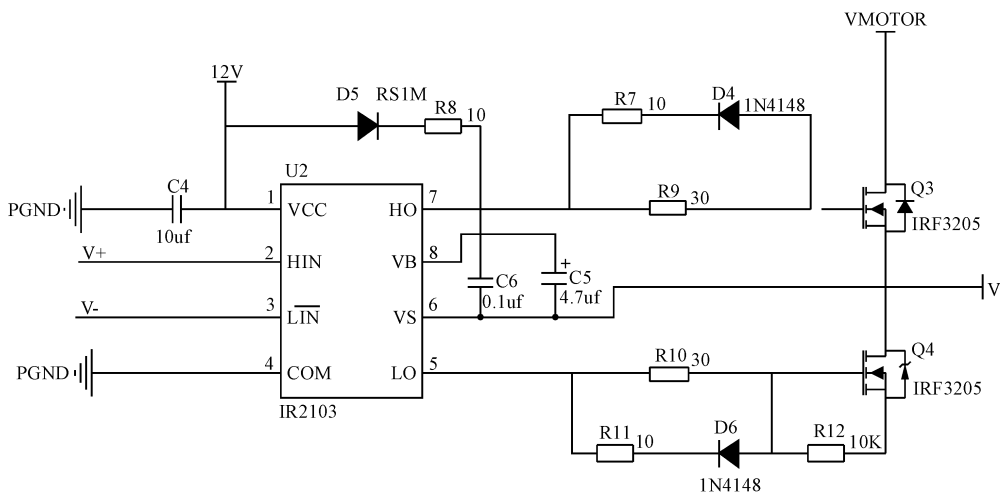


图5 逆变驱动电路

硬件保护电路如图 6 所示。

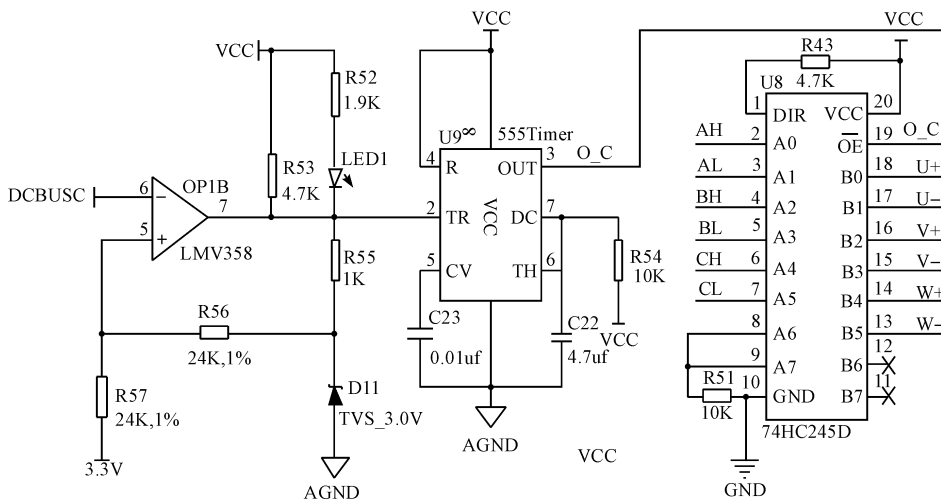


图6 硬件保护电路

2.2 系统软件设计

本研究遵循实时快速、可移植等原则,采用模块化设计思想,控制软件主要由主程序模块和中断模块组成。主程序主要实现硬件的初始化以及故障处理。中断程序是整个软件的核心部分,通过定时器中断计算霍尔信号跳变所占用时间,为估算转子的速度提供了依据。在三相电流 ADC 转换结束中断中,完成转子位置以及速度的估算,进行相电流、相电压等其它模拟量的采集、转换,实现磁链、转矩 PID 的调节以及相应波形的调制等。

其中,在计算转子速度时,利用定时器中断计算霍尔信号跳变所用时间,为使时间测量精度高,必须保持对计时时间较高的分辨率,所以在程序运行中需要不

断调整定时器的时钟分频数。基本原理是:如果计数值太低,减小定时器预分频的值,使其计数值上升;如果计数值太高,甚至计数溢出,应该增加分频器的数值,减少计数。其软件流程如图 7、图 8 所示。

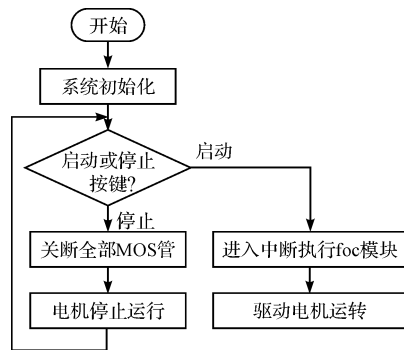


图7 控制系统软件流程图

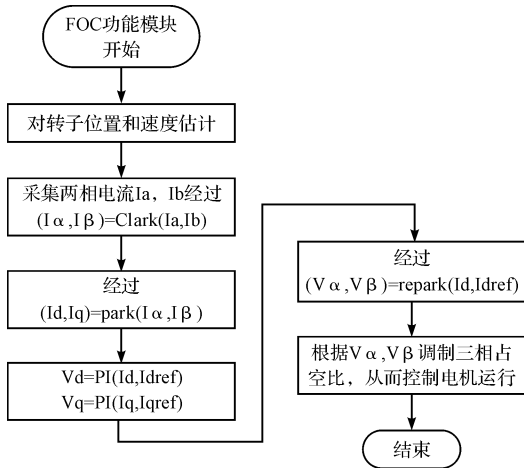


图 8 中断模块流程图

3 实验结果与分析

为验证系统的可行性与有效性,笔者搭建了实验平台,实验样机是一台三相带 Hall 传感器的无刷直流电机,电机参数为:额定电压 24 V,额定电流 3.4 A,额定功率 52 W,极对数为 4,额定转速 4 000 r/min,实验控制平台如图 9 所示。



图 9 无刷直流电机控制系统实验样机

由图 10 可知,在一个周期内电流出现了 7 次换相波动且电流波动较大,所以由相电流的波动引起的转矩波动较为明显,从而导致电机运行噪声较大,由图中计算可知,相邻两次电流最大波动是该周期内最大幅值的 64%。由图 11 可知,波形近似的平滑,电流波动较小没有出现明显波动,使用此种控制方式时相邻两次最大电流波动占该周期最大幅值的 12%。所以,采用矢量控制驱动无刷直流电机能有效降低换相电流的波动,减小运行噪声。

通过对图 1 中两种驱动方式原理对比分析可知,当电机在方波驱动方式进行 PWM 调制时,电机合成磁链为六步运行轨迹,电流的连续性不好,有部分能

量损失。而使用矢量控制时,电流的连续性较好,能量损失少,能源利用率高。

应用六步换相法时的相电流的波形图如图 10 所示。

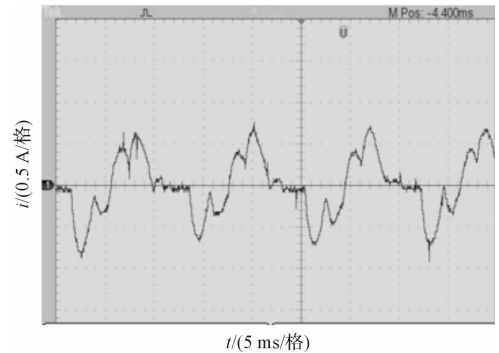


图 10 六步法相电流波形

采用矢量控制时的相电流波形如图 11 所示。

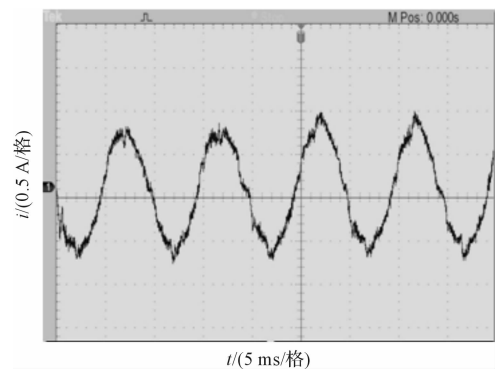


图 11 矢量控制法相电流波形

4 结束语

本研究就无刷直流电机常用的六步换相法中存在的转矩脉动以及噪声问题,研究了矢量控制算法以及实现的方法,以 STM32f103 系列单片机为控制核心,设计了矢量控制驱动电路,搭建了实验平台,研制了软件控制策略,实现了无刷直流电机的高效、平稳运行。

实验结果表明,采用矢量控制相比于采用六步换相驱动能使换相电流波动下降 52%,可有效减少转矩波动,低运行噪声、提高电源利用效率,有较高的应用价值。

参考文献 (References):

- [1] 王强,王友仁,孔德明. 隐极式无刷直流电机转子初始位置估计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 105-110.
- [2] 卢彬芳. 基于 DSP 的永磁同步电机控制系统的研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院, 2014.
- [3] 李志强. 无刷直流电机无位置传感器控制及四开关逆变

- 器控制研究[D].天津:天津大学电气与自动化工程学院,2009.
- [4] 王迎发.无刷直流电机换相转矩波动抑制与无位置传感器控制研究[D].天津:天津大学电气与自动化工程学院,2012.
- [5] BOUKAIS B, ZEROUG H. Magnet segmentation for commutation torque ripple reduction in a brushless DC motor drive [J]. **Magnetics, IEEE Transaction on.**, 2010, 44(11): 3909-3919.
- [6] 刘毅,贺益康,秦峰,等.基于转子凸极跟踪的无位置传感器永磁同步电机矢量控制研究[J].中国电机工程学报,2005,17(6):121-126.
- [7] KONTARCEK A, BAJEC P, NEMEC M, et al. Cost-Effective three-Phase PMSM drive tolerant to open-phase fault [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2015, 62(11):6708-6718.
- [8] 杨建飞,胡育文.无刷直流电机无磁链观测直接转矩控制[J].中国电机工程学报,2011,12(6):90-95.
- [9] 沛龙.移动机器人用小型无刷直流电机控制器的设计及其算法实现[D].北京:清华大学机械工程学院,2013.
- [10] 程帅,朱磊,杨小龙,等.基于DSPF2808的双闭环直流电机控制器[J].兵工自动化,2016,35(10):42-45.
- [11] 王成山,何伟,卢小敏.全自动蝶式圆台扭结包装机研发[J].包装与食品机械,2016(1):70-72.
- [12] 鲁文其,胡育文,杜栩杨,等.永磁同步电机新型滑模观测器无传感器矢量控制调速系统[J].中国电机工程学报,2010,33(6):78-83.

[编辑:张豪]

(上接第259页)

- [2] GROCHOLA L F, HABERMANN B, MASTRODOMENICO N, et al. Comparison of periprosthetic bone remodelling after implantation of anatomic and straight stem prostheses in total hip arthroplasty [J]. **Arch. Orthop. Trauma. Surg.**, 2008, 128(4):383-392.
- [3] 汪伟,王岩,崔健,等.股骨近端三维几何形态重建[J].中华外科杂志,2003,41(10):744-748.
- [4] XI W M, WANG A M, WU Q, et al. An integrated CAD/CAM/robotic milling method for custom cementless femoral prostheses [J]. **Medical Engineering and Physics**, 2015(37):911-915.
- [5] 韩文龙,朱建非,吴琪,等. CAD/CAM/Robotic 集成方法设计与制作生物型股骨柄假体[J].中国组织工程研究,2014,18(40):6413-6418.
- [6] WU L D, HAHNE H J, HASSENPFUG J. The dimensional accuracy of preparation of femoral cavity in cementless total hip arthroplasty[J]. **Journal of Zhejiang University: Science**, 2004, 5(10):1270-1278.
- [7] 史庆轩,李佩佳,孙磊,等.662髌 Ribbed 假体中远期临床疗效观察[J].中国矫形外科杂志,2012,20(15):1370-1373.
- [8] BAHARUDDIN M Y, SALLEH S H, ZULKIFLY A H, et al. Design process of cementless femoral stem using a non-linear three dimensional finite element analysis [J]. **BMC Musculoskeletal Disorders**, 2014, 15(30):1-17.
- [9] RAWAL B R, RIBEIRO R, MALHOTRA R, et al. Design and manufacturing of femoral stems for the Indian population [J]. **Journal of Manufacturing Processes**, 2012, 14(3):216-223.
- [10] PAWLIKOWSKI M, SKALSKI K, HARABURDA M. Process of hip joint prosthesis design including bone remodeling phenomenon [J]. **Computers and Structures**, 2003, 81(8-11):887-893.
- [11] SCHULZ A P, SEIDE K, QUEITSCH C. Results of total hip replacement using the Robodoc surgical assistant system: clinical outcome and evaluation of complications for 97 procedures [J]. **International Journal of Medical Robot & Computer Assisted Surgery**, 2007, 3(4):201-306.
- [12] 林茂义,朱建非,吴琪,等.机器人磨削技术制作定制式股骨柄假体[J].厦门大学学报:自然科学版,2015,54(3):440-444.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

李冬冬,潘海鹏,顾敏明.无刷直流电机矢量控制策略与实现[J].机电工程,2017,34(3):272-277.

LI Dong-dong, PAN Hai-peng, GU Min-ming. Vector control strategy of brushless DC motor and realization [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(3):272-277.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>